

# energija 5



ČASOPIS HRVATSKE ELEKTROPRIVREDE



UDK 621.31 ENJAAC 54 (5) 343 – 424 ISSN 0013-7448  
ENERGIJA • GODINA 54 • BROJ 5 • STRANA 343 – 424 • ZAGREB, LISTOPAD 2005.

ČASOPIS  
HRVATSKE ELEKTROPRIVREDE

# energija

IZDAVAČ – PUBLISHER

Godište 54 (2005)

Zagreb 2005

Br. 5

**Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb**

ZA IZDAVAČA

**Mr. sc. Ivan Mravak, dipl. ing.**

POMOĆ U IZDAVANJU

**Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa**

UREĐIVAČKI SAVJET – THE PUBLISHING COUNCIL

Mr. sc. Branko *Grgić*, dipl. ing. (predsjednik), HEP d.d., Split – Adrijano *Fišer*, dipl. ing., HEP Proizvodnja d.o.o., Rijeka – Marijan *Kalea*, dipl. ing., HEP Prijenos d.o.o., Osijek – Damir *Karavidović*, dipl. ing., HEP Distribucija d.o.o., Osijek – mr. sc. Mladen *Mandić*, dipl. oec., Zagreb – dr. sc. Vladimir *Mikuličić*, dipl. ing., FER Zagreb – dr. sc. Niko *Malbaša*, dipl. ing., Ekonerg, Zagreb

UREDNIČKI ODBOR – EDITORIAL BOARD

Glavni urednik – Editor-in-chief: dr. sc. Zorko *Cvetković*, dipl. ing.  
Urednik – Editor: mr. sc. Slavica *Barta-Koštrun*, dipl. ing.  
Lektor – Šimun *Čagalj*, prof.  
Grafički urednik – Graphic Editor: Miroslav *Trajković*

HEP d.d. – Energija  
Uredništvo – The Editorial Board  
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb  
Telefoni: +385 1 /632-2641 i 632-2083  
Telefaks: +385 1 /617-0438  
e-mail: [energija@hep.hr](mailto:energija@hep.hr) i [slavica.barta@hep.hr](mailto:slavica.barta@hep.hr)  
[www.hep.hr](http://www.hep.hr)

**Godišnje izlazi 6 brojeva.**

Godišnja pretplata bez PDV-a (22 %) iznosi:  
- za pojedince 245,90 kn  
- za poduzeća 394,16 kn  
- za studente 57,38 kn

Žiro račun kod Zagrebačke banke broj:  
2360000-1400129978

Godišnja pretplata za inozemstvo iznosi US\$ 95.

Devizni račun:  
Zagrebačka banka broj: 2000006299  
Tisak: Intergrafika d.o.o., Zagreb  
Naklada 1000 primjeraka

SADRŽAJ

<i>Tot, M. – Jurić, Ž.</i> : Sustav trgovine emisijom stakleničkih plinova u Europskoj uniji (pregledni članak) .....	343
<i>Santica, I.</i> : Podmorske energetske kabelaške trase, dugoročna vizija gospodarenja podmorjem i zaštita podmorskog okoliša (pregledni članak) .....	351
<i>Bajs, D.</i> : Uklapanje novih kombiniranih plinsko-parnih elektrana (KTE) u elektroenergetski sustav (prijenosnu mrežu) Republike Hrvatske (stručni članak) .....	359
<i>Uran, V.</i> : Analiza rizičnosti projekta (pregledni članak).....	377
<i>Plavšić, T. – Kuzle, I.</i> : Regulacija napona i jalove snage kao pomoćna usluga sustava (prethodno priopćenje).....	385
<i>Vujević, D.</i> : Andersenova petlja (stručni članak) .....	397
Vijesti iz elektroprivrede i okruženja .....	405
Iz inozemne stručne literature .....	414

Fotografije na omotu:

**TE-TO ZAGREB** (str. 1., 3. i 4.)

Časopis je ubilježen u Ministarstvu kulture i prosvjete – Sektor informiranja pod brojem 161 od 12. 11. 1992.

# REGULACIJA NAPONA I JALOVE SNAGE KAO POMOĆNA USLUGA SUSTAVA

Mr. sc. Tomislav PLAVŠIĆ – doc. dr. sc. Igor KUZLE, Zagreb

UDK 621.3.026.5:621.316.71  
PRETHODNO PRIOPĆENJE

Unatoč razvoju tržišta električne energije izračun troškova proizvodnje/potrošnje jalove snage sinkronih generatora te mrežnih kompenzacijskih uređaja još uvijek nije u potpunosti definiran, a uspostava tržišnih mehanizama za jalovu snagu u većini je zemalja još uvijek u začetku. Razlog tomu je mali ekonomski značaj optimiranja tokova jalove snage. Zbog svojeg utjecaja na mogućnost prijenosa djelatne snage, te povezanosti s iznosima napona u sustavu, a time i s naponskom stabilnošću elektroenergetskog sustava, jalova snaga zaslužuje pažnju i ozbiljna razmatranja s ciljem definiranja metodologije za određivanje njene cijene na tržištu. U članku je opisana problematika određivanja troškova proizvodnje/potrošnje jalove snage te su navedeni mehanizmi za uspostavu tržišta jalovom snagom. Dan je pregled značajnijih modela tržišta jalovom snagom uspostavljenih u svijetu.

**Ključne riječi:** upravljanje naponom i jalovom snagom, tržište električne energije, usluge sustava, operator prijenosnog sustava, cijena jalove snage

## 1 UVOD

Razvojem tržišta električne energije od osobite važnosti postaje propusnost prijenosnog sustava, odnosno sposobnost prijenosa električne energije na velike udaljenosti, od proizvodnih jedinica do potrošača, kroz visokonaponsku električnu mrežu. Ta je propusnost često limitirana zbog tehničkih ograničenja koja proizlaze iz svojstava prijenosnih vodova i transformatora te elektroenergetskog sustava (EES) u cjelini. U struci, ali i izvan nje, sve se češće koriste pojmovi poput prijenosne moći, prekogranične prijenosne moći, zagušenja u mreži.

Sigurnost prijenosa električne energije i očuvanje stabilnosti elektroenergetskog sustava zadaće su Operatora prijenosnog sustava (OPS – eng. Transmission System Operator - TSO). Da bi osigurao normalan rad EES-a i osigurao potrošačima sigurnu i kvalitetnu opskrbu električnom energijom OPS koristi pomoćne usluge sustava (primarna i sekundarna regulacija djelatne snage i frekvencije, primarna i sekundarna regulacija napona i jalove snage, hladna i rotirajuća pričuva, sposobnost starta iz beznaponskog stanja, sposobnost izoliranog rada,...) onih korisnika mreže koji su opremljeni odgovarajućom automatikom i uređajima. Većina pomoćnih usluga sustava nužnih za normalan pogon EES-a uzrokuje dodatne troškove njihovim ponuđačima koji se ne mogu identificirati kroz primjenu energetske tarife. Postoje

dvije alternative: ili nametnuti osiguranje pomoćnih usluga sustava kroz tehničku regulativu (tzv. mandatorne usluge), ili ustrojiti tržišno okruženje unutar kojeg će osiguravatelji pomoćnih usluga biti poticani odgovarajućom financijskom naknadom (tzv. komercijalne usluge).

Da bi se maksimizirao prijenos djelatne snage kroz prijenosnu mrežu potrebno je minimizirati tokove jalove snage kroz elemente mreže. Istodobno, tokovi jalove snage nužni su radi održavanja razina napona u mreži unutar propisanih granica kako bi se održala sigurnost elektroenergetskog sustava i potrošačima osigurala kvalitetna električna energija. Regulacija napona i jalove snage usluga je sustava koju osigurava Operator prijenosnog sustava koristeći pri tome mrežne kompenzacijske uređaje (kondenzatorske baterije, prigušnice) u svojoj nadležnosti te pomoćne usluge proizvođača električne energije koji mu induktivnu ili kapacitivnu jalovu snagu isporučuju korištenjem sinkronih generatora prema određenom, unaprijed ugovorenom, mehanizmu (vozni red jalove snage).

Analiza troškova osiguranja jalove snage kao pomoćne usluge i uspostava prikladnog mehanizma plaćanja te usluge od iznimnog su ekonomskog i pogonskog značenja u deregulaciji elektroprivrednog sektora:

1. Zadovoljavajuća politika cijena olakšat će pristup mreži i poboljšati ekonomsku učinkovitost. Ispravno određivanje cijene jalove snage i mehanizma plaćanja

omogućit će korisnicima prijenosne mreže donošenje odluka u pogledu ekonomskih aktivnosti (transakcije električne energije, investicije, iskorištenje opreme, itd.).

2. Poboljšat će se pouzdanost i ekonomičnost pogona EES-a s obzirom na potporu jalovom snagom te će se smanjiti gubici djelatne snage.
3. Poboljšat će se naponski profil u mreži, što za posljedicu ima smanjenje broja mogućih pogonskih poremećaja uzrokovanih niskim ili visokim vrijednostima napona.

Smatra se [1] da uspostava transparentnog i funkcionalnog tržišta jalovom snagom ovisi o:

- funkcionalnoj deregulaciji energetske djelatnosti koje omogućavaju regulaciju napona i jalove snage,
- donošenju Mrežnih pravila koja će propisati tehničke norme i koordinaciju između energetskih subjekata za proizvodnju i prijenos električne energije s ciljem osiguranja stabilnog pogona EES-a,
- točnom i razvidnom određivanju troškova potpore EES-a jalovom snagom iz sinkronih generatora, odnosno mrežnih kompenzacijskih uređaja.

Veća pažnja problemu jalove snage kao usluge sustava dana je tek krajem 90-ih godina prošlog stoljeća, dakle, kada je tržište električne energije već zaživjelo, u većoj ili manjoj mjeri, u mnogim svjetskim EES-ima, prvenstveno u SAD-u, ali i u europskim i južno američkim zemljama te Australiji. U zadnjih 7 do 8 godina publiciran je značajan broj članaka na temu izračuna troškova proizvodnje/potrošnje jalove snage te uspostave funkcionalnog tržišta jalovom snagom kao uslugom sustava.

U [1] razmatrane su značajke jalove snage kao pomoćne usluge sustava koje utječu na određivanje troškova njene proizvodnje: osiguranje dovoljne pričuve jalove snage u sustavu, kapacitivni i induktivni karakter jalove snage, dinamička i statička potpora sustava jalovom snagom, kapacitet proizvodnje jalove snage i troškovi proizvodnje. Predložena je originalna koncepcija izračuna potreba prijenosnog sustava za jalovom snagom zbog jedinične promjene opterećenja EES-a, izražene u MVA. Kao mjera te potrebe predstavljen je tzv. faktor podešenja jalove snage koji se sastoji od tri komponente: promjene opterećenja EES-a jalovom snagom, gubitaka jalove snage zbog opterećenja EES-a djelatnom snagom i gubitaka jalove snage zbog opterećenja EES-a jalovom snagom. Predstavljene su tri metode za određivanje i nadoknadu troškova proizvodnje jalove snage sinkronim generatorima.

U [2] prikazana je metodologija određivanja cijene proizvodnje/potrošnje jalove snage temeljena na teoriji graničnih troškova djelatne i jalove snage uz korištenje neulančenih optimizacijskih metoda. Kao funkcije cilja neulančenog proračuna optimalnih tokova snaga korištene su minimizacija troškova proizvodnje (djelatna snaga), odnosno minimizacija gubitaka prijenosa (jalova snaga).

Proračun je sastavljen iz dva koraka – prvo se rješava P-f model (djelatna snaga), a zatim, na temelju tog rješenja, rješava se Q-U model (jalova snaga).

U [3] predložen je ustroj tržišta jalovom snagom koji se temelji na korištenju funkcije očekivanog plaćanja EFP (eng. expected payment function) proizvođaču električne energije za uslugu proizvodnje/potrošnje jalove snage. EFP se sastoji od više komponenti, kao što su dostupnost, trošak gubitaka u namotima zbog proizvodnje jalove snage, oportunitetni trošak (gubitak prihoda zbog pojačane proizvodnje jalove snage što rezultira smanjenjem planirane proizvodnje djelatne snage). Uvrštavanje ovih komponenti unutar EPF ovisi o području rada sinkronog generatora. Konačna ideja autora je da OPS prikuplja na tržištu ponude za proizvodnju/potrošnju jalove snage temeljene na EPF strukturi i zatim provodi proračun optimalnih tokova snaga kako bi minimizirao svoje troškove. Optimiranje se provodi u dva koraka: prvo se određuje granična korist svake ponude s obzirom na gubitke koje će njeno angažiranje izazvati u sustavu, a zatim se minimizira plaćanje za jalovu snagu s obzirom na formirane funkcije očekivanog plaćanja proizvođačima koji su OPS-u dostavili svoje ponude. Na taj način OPS odabire one ponuđače čije mu angažiranje donosi najveću graničnu korist, a čija je cijena ponude razumna i prihvatljiva.

U [5] navode se dvije značajke tržišta jalovom snagom: 1. kapitalni troškovi kompenzacijske opreme vrlo su visoki u usporedbi s pogonskim troškovima, 2. trenutne cijene jalove snage su izuzetno promjenjivog karaktera. Autori su predstavili teoriju tzv. cjenovno ovisnih opterećenja (eng. price-dependent load theory). Model cjenovno ovisnih opterećenja temeljen je na postojanju funkcije potrošačke koristi (eng. consumer benefit function). Iz nje se određuje funkcija potražnje za djelatnom i jalovom snagom čije dodavanje u proračun optimalnih tokova snaga vodi ka maksimiziranju društvene dobrobiti (eng. social welfare). Mehanizam ovakvog tržišta jalovom snagom zahtijeva od sudionika davanje funkcije ponude i potražnje na temelju kojih OPS određuje optimalno rješenje.

U drugom poglavlju ovog rada opisani su troškovi proizvodnje/potrošnje jalove snage sinkronih generatora i mrežnih kompenzacijskih uređaja te je predstavljen problem određivanja naknade za proizvedenu/potrošenu jalovu snagu. U trećem poglavlju dane su osnovne smjernice razvoja tržišta jalovom snagom, a u četvrtom poglavlju opisana su svjetska iskustva pri ustroju tržišta jalovom snagom.

## 2 TROŠKOVI PROIZVODNJE/POTROŠNJE JALOVE SNAGE

Na temelju iskustava zemalja s razvijenim tržištem jalove snage kontinuirano pružanje usluga regulacije napona i jalove snage može biti osigurano ispunjavanjem dvaju

Tablica 1 - Značajke uređaja za regulaciju napona i jalove snage

Uređaj	Brzina odziva	Sposobnost regulacije napona	Troškovi		
			Kapitalni (po KVAR)	Pogonski	Oportunitetni
<b>Sinkroni generator</b>	Brza, kontinuirana	Izvrсна, sposobnost dodatnog kratkoročnog kapaciteta	Teško razlučivi	Visoki	Da
<b>Sinkroni kompenzator</b>	Brza, kontinuirana	Izvrсна, sposobnost dodatnog kratkoročnog kapaciteta	30-35 \$	Visoki	Ne
<b>Kondenzatorska baterija</b>	Spora, diskretna	Slaba, pada s $U^2$	8-10 \$	Vrlo niski	Ne
<b>Statički VAR kompenzator</b>	Brza, kontinuirana	Slaba, pada s $U^2$	45-50 \$	Umjereni	Ne
<b>STATCOM</b>	Brza, kontinuirana	Zadovoljavajuća, pada s $U$	50-55 \$	Umjereni	Ne

uvjeta: 1. uvođenjem odgovarajućih tehničkih pravila za osiguranje minimalnih nužnih količina jalove snage, i 2. određivanjem ukupnih troškova proizvodnje/potrošnje jalove snage, kako bi se uspostavili komercijalni mehanizmi za pravednu naknadu tih troškova.

Pri razmatranju troškova proizvodnje/potrošnje jalove snage potrebno je uzeti u obzir i sinkrone generatore i mrežne kompenzacijske uređaje te sagledati njihove posebnosti i ulogu u regulaciji napona i jalove snage (tablica 1), [9]. Uočljive su značajne razlike između sinkronog stroja i mrežnih kompenzacijskih uređaja u smislu dinamičkih karakteristika, utjecaja na naponske prilike u mreži te troškova. Dok je još moguća usporedba tih uređaja oko kapitalnih i pogonskih troškova, oportunitetni trošak proizvodnje/potrošnje jalove snage značajka je isključivo sinkronog generatora i predstavlja onaj dio profita koji će proizvođač električne energije izgubiti smanjujući proizvodnju djelatne snage kako bi mogao proizvesti više induktivne ili kapacitivne jalove snage.

## 2.1 Troškovi proizvodnje/potrošnje jalove snage sinkronih generatora

Nazivni faktor snage sinkronog generatora veličina je koja definira međusobni odnos nazivne djelatne snage i nazivne jalove snage:

$$\cos \varphi_n = \frac{P_n}{\sqrt{P_n^2 + Q_n^2}} \quad (1)$$

Nazivni faktor snage predstavlja karakterističnu veličinu svakog sinkronog generatora koja ukazuje na sposobnost proizvodnje/potrošnje jalove snage stroja. Generator s nižim nazivnim faktorom snage moći će, u jednakim uvjetima, proizvesti veću jalovu snagu.

Maksimalna djelatna snaga sinkronog generatora ovisi o maksimalnoj snazi pogonskog stroja i ne može se povećavati konstrukcijskim zahvatima. Maksimalnu jalovu snagu koju u mrežu može dati sinkroni generator pri maksimalnoj proizvodnji djelatne snage moguće je povećati

samo konstrukcijski, povećanjem dimenzija generatora što neposredno utječe na cijenu stroja. Stoga je pri određivanju nazivnog faktora snage novog sinkronog generatora nužno istražiti njegovu ulogu u regulaciji napona i jalove snage dijela mreže u neposrednoj blizini elektrane.

Pogonska karta sinkronog generatora dijagram je koji prikazuje granice opterećenja stroja djelatnom i jalovom snagom u stacionarnom pogonu. Na slici 1 prikazana je pogonska karta sinkronog generatora agregata 1 HE Gojak, nazivne snage 16 MW i nazivnog faktora snage 0,8. Stabilno područje rada sinkronog generatora ograničeno je s obzirom na proizvodnju djelatne snage značajkama pogonskog stroja (maksimalna snaga pogonskog stroja, tehnički minimum). Proizvodnja jalove snage ograničena je zbog zagrijavanja statora, zagrijavanja rotora (maksimalna uzbuda), gubitka napona uzbude (minimalna uzbuda) te zbog granica statičke stabilnosti.

Ukupni troškovi koje snosi proizvođač električne energije zbog proizvodnje jalove snage sinkronog generatora sastoje se od dvije komponente:

- eksplicitni ili neposredni troškovi

- implicitni ili posredni troškovi (oportunitetni).

Eksplicitni troškovi proizvodnje jalove snage dodatno se mogu podijeliti na fiksne ili kapitalne troškove i varijabilne troškove, tj. troškove pogona. Implicitni troškovi u literaturi se najčešće nazivaju oportunitetni troškovi i mogu se klasificirati kao varijabilni.

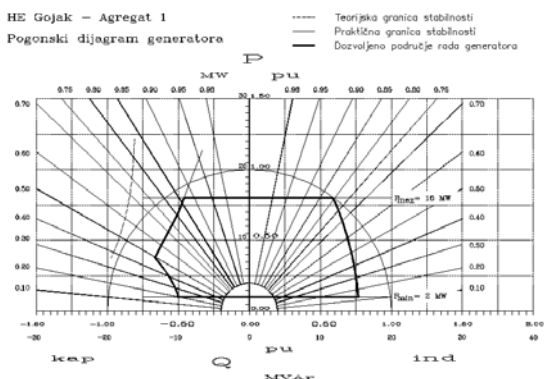
Kapitalni troškovi predstavljaju investicijske troškove s obzirom na mogućnosti proizvodnje jalove snage generatora i neposredno su povezani s nazivnim faktorom snage. U literaturi se spomenuta mogućnost proizvodnje jalove snage generatora naziva i kapacitet proizvodnje jalove snage (eng. reactive power capacity) [1]. Kapitalni troškovi čine najveći dio ukupnog troška generatora kao izvora jalove snage. Kapitalni troškovi sinkronog generatora najčešće se dovode u vezu s mogućnošću proizvodnje djelatne snage i izražavaju se u \$/MW. Da bi se ocijenio dio kapitalnih troškova koji se odnosi na mogućnost proizvodnje jalove

snage treba ih izraziti u odnosu na ukupne kapitalne troškove  $KT_S$  (\$/MVA):

$$KT_S = KT_P \cdot \cos \varphi_n \quad (2)$$

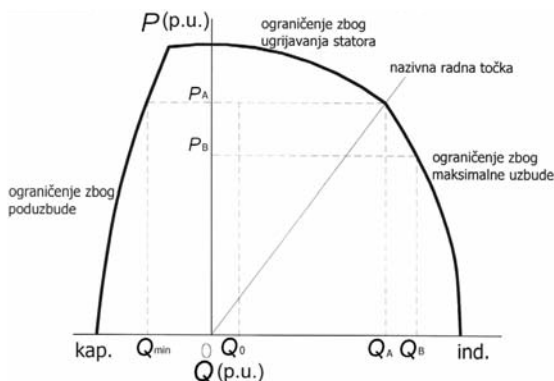
gdje  $KT_P$  označava kapitalne troškove koji se odnose na mogućnost proizvodnje djelatne snage. Dio kapitalnih troškova koji se odnosi na mogućnost proizvodnje jalove snage  $KT_Q$  (\$/MVAR) može se tada izraziti kao:

$$KT_Q = KT_S \cdot \sin \varphi_n \quad (3)$$



Slika 1 - Pogonska karta sinkronog generatora u HE Gojak

Pri razmatranju varijabilnih troškova (eksplicitnih i implicitnih) sinkronog generatora nužno je raspolagati važećom pogonskom kartom kako bi se mogla ocijeniti stvarna pogonska ograničenja. Na slici 2 definirana su područja rada sinkronog generatora obzirom na troškove proizvodnje jalove snage.



Slika 2 - Područja rada sinkronog generatora obzirom na troškove proizvodnje jalove snage

Na slici 2  $Q_0$  označava vlastitu potrošnju jalove snage elektrane i definira graničnu vrijednost za područje rada generatora ( $P_A, 0-Q_0$ ) unutar kojeg proizvođač ne može

zahtjevati naknadu za proizvedenu jalovu snagu. Pogonsku točku unutar područja rada generatora ( $P_A, Q_0-Q_A$ ) definira prvenstveno automatski primarni regulator napona generatora.  $Q_A$  označava graničnu mogućnost proizvodnje jalove snage, pri proizvodnji djelatne snage iznosa  $P_A$ , zbog zagrijavanja uzbuđenog namota. Povećanje proizvodnje jalove snage od  $Q_0$  do  $Q_A$  ne zahtjeva smanjenje proizvodnje djelatne snage  $P_A$ , ali traži povećanje struje uzbuđene i napona na stezaljkama generatora. Takav režim rada generatora uzrokuje dodatne gubitke i zagrijavanje uzbuđenog namota što se odražava na skraćivanje životnog vijeka sinkronog generatora i povećane troškove održavanja te ovo područje rada definira varijabilne eksplicitne troškove.

U kontekstu varijabilnih eksplicitnih troškova potrebno je posebno razmotriti rad sinkronog generatora u kompenzatorskom režimu rada. Ovakav režim rada generatora karakterističan je za period noćnih minimuma kada slabo opterećeni prijenosni vodovi generiraju jalovu snagu. Povećani tokovi jalove snage uzrokuju povišenje napona u mreži te se moraju kompenzirati (apsorbirati) kako bi vrijednosti napona ostale unutar propisanih ograničenja. U kompenzatorskom režimu rada uglavnom se, u svijetu i u nas, koriste hidrogenatori. Hidrogenator u kompenzatorskom režimu rada uobičajeno nema oportunitetnog troška jer tada nije angažiran za proizvodnju djelatne snage. Svi se pogonski troškovi mogu definirati kao eksplicitni i odnose se na potrošnju električne energije za pogon pomoćnih postrojenja elektrane u kompenzatorskom režimu rada agregata i troškove održavanja. Iako su hidrogenatori projektirani za rad u kompenzatorskom režimu rada ovakav je pogon vrlo nepovoljan za generator zbog povišenih temperatura ulja za podmazivanje i ležajeva [6], povećanja vibracija i dodatnog zagrijavanja namota. Takav režim rada skraćuje životni vijek generatora te uzrokuje dodatne troškove zbog potrebnog pojačanog održavanja agregata.

Prijelaz rada sinkronog generatora iz pogonske točke ( $P_A, Q_A$ ) u pogonsku točku ( $P_B, Q_B$ ), (slika 2), uzrokovat će oportunitetni trošak rada generatora zbog smanjenja proizvodnje djelatne snage. Oportunitetni trošak proizvodnje jalove snage  $OT_Q$  odgovara maksimalnom mogućem profitu  $\pi_p$  izgubljenom zbog neproizvedene djelatne snage:

$$OT_Q = \max(0, \pi_p) \quad (4)$$

Vrijednost oportunitetnog troška određena je cijenom proizvodnje i uvjetima na tržištu električne energije. Sljedeći primjer [7] oslikava situaciju u kojoj proizvođač električne energije želi povećati proizvodnju jalove snage za iznos  $\Delta Q$  pri čemu mora smanjiti proizvodnju djelatne snage za iznos  $\Delta P$ . Oportunitetni trošak za  $\Delta Q$  ovisi o profitu za  $\Delta P$ . Moguće je definirati šest slučajeva obračuna oportunitetnog troška iz kojeg proizlazi da li se proizvođaču isplati proizvoditi jalovu snagu na račun smanjenja proizvodnje djelatne snage (tablica 2).

Tablica 2 - Šest slučajeva obračuna oportunitetnog troška

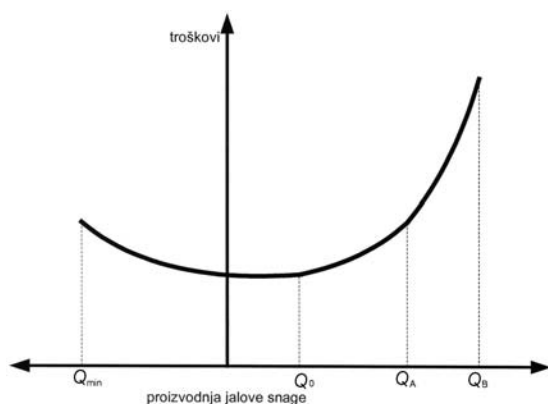
	Slučaj 1	Slučaj 2	Slučaj 3	Slučaj 4	Slučaj 5	Slučaj 6
$T_p$	11	11	8	8	8	8
$c_p$	10	10	10	10	10	10
$\pi_p$	-1	-1	2	2	2	2
$ET_Q$	3	1	1	1	1	1
$OT_Q$	0	0	2	2	2	2
$c_Q$	2	2	2	3	5	6
$\pi_Q$	-1	1	-1	0	2	3
$\Delta P$	Ne	Ne	Da	Da	Ne	Ne
$\Delta Q$	Ne	Da	Ne	Ne	Da	Da

$T_p$ ,  $c_p$  i  $\pi_p$  označavaju trošak, cijenu i profit pri promjeni proizvodnje djelatne snage  $\Delta P$ , a  $ET_Q$ ,  $OT_Q$ ,  $c_Q$  i  $\pi_Q$  označavaju eksplicitni trošak, oportunitetni trošak, cijenu i profit pri promjeni proizvodnje jalove snage  $\Delta Q$ . Pri tome vrijede sljedeće jednadžbe:

$$\pi_p = c_p - T_p \quad (5)$$

$$\pi_Q = c_Q - ET_Q - OT_Q \quad (6)$$

U svih šest slučajeva u tablici 2. pretpostavljena je jednaka tržišna cijena za djelatnu snagu. U prva dva slučaja pretpostavljeni su visoki troškovi proizvodnje djelatne snage što za posljedicu ima negativan profit i nepostojanje oportunitetnog troška za  $\Delta Q$ . U slučaju 1 eksplicitni troškovi za  $Q$  su visoki te se ne isplati proizvoditi niti jalovu snagu. Slučaj 2 ima niske eksplicitne troškove za  $Q$  te je profit od proizvodnje jalove snage pozitivan. Ovaj bi slučaj mogao biti reprezentativan za starije agregate manjih snaga čija lokacija (dijelovi mreže s velikom koncentracijom opterećenja) te niski eksplicitni troškovi proizvodnje jalove snage ukazuju na mogućnost profitabilnog korištenja u regulaciji napona i jalove snage tijekom perioda vršnih opterećenja. U slučajevima 3 do 6 pretpostavljeni su jednaki eksplicitni troškovi za  $Q$  i jednaki profit za  $P$ , ali



Slika 3 - Troškovi proizvodnje jalove snage sinkronog generatora

je tržišna cijena jalove snage različita te ona diktira režim rada generatora. Iz tablice 2 vidljivo je da se u slučaju 6 više isplati proizvoditi jalovu nego djelatnu snagu, dok je u slučaju 5 profit isti, ali zbog potreba sustava i dobre suradnje s OPS-om preferira se proizvodnja jalove snage.

Na slici 3 prikazan je oblik krivulje ovisnosti troškova proizvodnje jalove snage o količini proizvedene jalove snage sinkronog generatora.  $Q_A$ ,  $Q_B$ ,  $Q_0$  i  $Q_{\min}$  odgovaraju vrijednostima iz slike 2.

## 2.2 Troškovi proizvodnje/potrošnje jalove snage mrežnih kompenzacijskih uređaja

### 2.2.1 Kondenzatorske baterije i prigušnice

Kondenzatorske baterije i prigušnice su pasivni diskretni kompenzacijski uređaji koji proizvode, odnosno apsorbiraju jalovu snagu. Kapitalni troškovi čine najveći udio u ukupnim troškovima proizvodnje/potrošnje jalove snage kondenzatorskih baterija, odnosno prigušnica. Varijabilni troškovi odnose se na troškove održavanja sklopne opreme i samih uređaja te stopu amortizacije sklopne opreme u ovisnosti od broja sklopnih operacija. U literaturi se znaju navoditi i troškovi zbog gubitaka [8] i [9], koji su proporcionalni snazi kompenzacijskog uređaja. U slučaju prigušnice snage 150 MVAr gubici znaju biti oko 160 kW.

Broj sklopnih operacija prekidača kondenzatorskih baterija, odnosno prigušnica, značajna je stavka koju svakako treba uzeti u obzir pri razmatranju pogonskih troškova ovih uređaja. Svaka sklopna operacija uzrokuje pojavu prenapona koji utječe na skraćivanje životnog vijeka prekidača te iziskuje potrebu pojačanog održavanja i sklopne opreme i samog uređaja. Budući da se sklopna oprema nakon određenog broja sklopnih operacija podvrgava generalnom remontu, troškovi takvog remonta mogli bi poslužiti za određivanje pogonskih troškova kondenzatorskih baterija, odnosno prigušnica.

Ovi su uređaji sastavni dio prijenosne mreže, u vlasništvu su Operatora prijenosnog sustava (TSO model) ili tvrtki zaduženih za prijenos električne energije (ISO model), te njihove troškove treba promatrati kao dio troškova pogona prijenosne mreže i potrebno ih je uključiti unutar energetske tarife za prijenos (tzv. mrežarine).

### 2.2.2 Sinkroni kompenzatori

Sinkroni kompenzatori rotacijski su uređaji koji osiguravaju pričuvu jalove snage tijekom pogona elektroenergetskog sustava te im je glavna zadaća regulacija napona tijekom prijelaznih perioda. Stoga je proizvodnja jalove snage sinkronih kompenzatora pri normalnom pogonu EES-a minimalna. Sinkroni kompenzatori mogu se koristiti u

normalnim pogonskim uvjetima za povećanje prijenosne moći između dva područja pomicanjem granice naponske stabilnosti. Tijekom pogona sinkronih kompenzatora stvaraju se određeni gubici djelatne snage izazvani proizvedenom/potrošenom jalovom snagom. Ovi se gubici mogu smatrati konstantnima te iznose oko do 3 % nazivne snage uređaja. Budući da se sastoje od rotirajućih dijelova i pomoćnih uređaja sinkroni kompenzatori zahtijevaju više održavanja od statičkih kompenzatora ili pasivnih kompenzacijskih uređaja. Zbog visokih troškova izgradnje i pogona u svijetu se više ne ugrađuju sinkroni kompenzatori.

### 2.2.3 Statički kompenzatori - SVC

Statički kompenzatori ili SVC (eng. static var compensator) kao i sinkroni kompenzatori reguliraju napon tijekom prijelaznih perioda. Kapitalni troškovi ovih uređaja vrlo su visoki, a pogonski uključuju gubitke i troškove održavanja. Gubici se javljaju u namotima, kabelima, itd., a ovisе o količini jalove snage koja se proizvodi/troši. U pravilu, sklopne operacije SVC-a ne utječu na životni vijek sklopne opreme i samih uređaja. U [10] dan je primjer instalacije prenosivog SVC uređaja od strane NGC-a (eng. National Grid Company) za potrebe potpore jalovom snagom prijenosnog sustava u Velikoj Britaniji. Predmetna instalacija omogućuje prenošenje uređaja u slabe točke mreže, prema potrebi, što daje veliku pogonsku fleksibilnost.

### 2.2.4 Statički sinkroni kompenzatori – STATCOM

STATCOM pripada grupi FACTS (eng. flexible AC transmission system) uređaja. Sličan je statičkom kompenzatoru po brzini odziva, upravljačkim sposobnostima te korištenju uređaja energetske elektronike. STATCOM je strujno ograničen te je njegov izlaz (MVar) linearno ovisan o naponu za razliku od kvadratne ovisnosti o naponu kondenzatorskih baterija ili statičkih kompenzatora. Na taj način je njegov doprinos posebno značajan u sprječavanju sloma napona. Odlikuju ga izrazito visoki kapitalni troškovi.

### 2.2.5 Transformatori s mogućnošću promjene prijenosnog omjera pod opterećenjem

Transformatore s mogućnošću promjene prijenosnog omjera pod opterećenjem (eng. OLTC – On Load Tap Changer) može se smatrati uređajima koji sudjeluju u pružanju pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage. Učestalost održavanja, iz čega proizlazi glavina pogonskih troškova, ovisi o stupnju korištenja regulacijske preklapke. OLTC transformatori mogu se smatrati sastavnim dijelom prijenosne mreže te bi njihovi troškovi, kao i ostalih mrežnih kompenzacijskih uređaja, trebali biti sastavni dio energetske tarife za prijenos.

## 3 TRŽIŠTE JALOVOM SNAGOM

Ustroj tržišta za pružanje pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage (tržišta jalovom snagom), otežava nekoliko čimbenika. Prvi i najznačajniji je lokalni karakter jalove snage koji stvara velike razlike u potrebama za jalovom snagom od regije do regije te od čvorišta do čvorišta. Ako unutar problematičnih regija postoji ograničen broj proizvođača jalove snage tada dolazi do pojave tržišne moći (eng. market power) tj. monopola takvih korisnika mreže koji diktiraju cijenu jalove snage uzrokujući OPS-u znatne troškove, dok električka udaljenost onemogućava ostale sudionike na tržištu da se ravnopravno upuste u tržišno natjecanje. Drugi je problem složenost i nesigurnost planiranja voznog reda jalove snage, tj. potreba sustava za jalovom snagom, zbog velikih dnevnih varijacija tokova jalovih snaga uzrokovanih karakterom potrošača u EES-u. Treći problem je nedovoljna točnost mehanizama za naknadu troškova proizvodnje jalove snage, što čini profit nesigurnim i otežava investicije. O predmetnim problemima više je spomenuto u poglavlju 2.

U dereguliranom okruženju moguća su dva načina financijske naknade ponuđačima za pružanje pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage:

- Naknada na temelju kapaciteta za proizvodnju jalove snage – regulirana usvojenim standardima i ograničenjima koja se moraju poštivati (iznosi napona, faktor snage, ...), za naknadu ključni kapitalni troškovi uređaja, dugoročni ugovori, osiguranje sigurnosti pogona EES-a.
- Naknada na temelju tržišnog ustroja pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage - određivanje trenutnih cijena (eng. spot price) na tržištu jalove snage temeljem optimizacijskih ili nekih drugih algoritama, za naknadu ključni pogonski troškovi uređaja, kratkoročni ugovori, osiguranje ekonomičnog i sigurnog pogona EES-a

### 3.1 Naknada troškova proizvodnje jalove snage na temelju kapaciteta za proizvodnju jalove snage

Naknada ponuđačima na temelju kapaciteta proizvodnje jalove snage njihovih proizvodnih jedinica također omogućuje tržišno natjecanje, ali je ovom slučaju ono dugoročnog karaktera i usmjereno je isključivo na sigurnosni aspekt vođenja pogona. OPS i prema određenom tehničko-ekonomskom kriteriju odabrani ponuđač pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage potpisuju dugoročni ugovor koji ponuđača obvezuje na regulaciju napona u propisanim granicama prema zahtjevima OPS-a uz točno definiran način naknade za proizvedenu jalovu snagu. Ukupna nadokada pri tome treba uzeti u obzir kapacitet proizvodnje jalove snage koji proizvodna jedinica može osigurati i njena regulacijska svojstva (vremenska konstanta odziva primarnog regulatora



napona, integracijska konstanta u slučaju sudjelovanja u sekundarnoj regulaciji napona i jalove snage).

Da bi se budućem ponuđaču pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage isplatilo investirati u povećanje opsega regulacije nove proizvodne jedinice, odnosno postojećem ponuđaču isplatilo ulaziti u ugovorni odnos s OPS-om potrebno je da mehanizam naknade za kapacitet bude jednostavan i razvidan te da se sudionicima tržišta pošalje ispravna poruka.

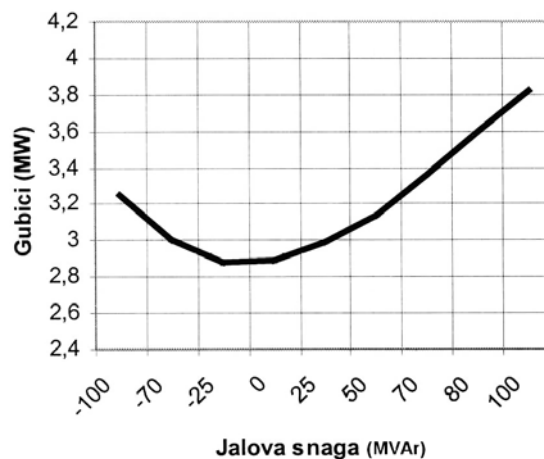
Primjena naknade za proizvodnju jalove snage na temelju kapaciteta, uz postavljanje nužnih zahtjeva na proizvodne jedinice u smislu obveznog regulacijskog opsega i regulacijskih značajki koje moraju zadovoljiti, bez dobivanja financijske naknade od strane OPS-a preporučljiv je korak u početnom stupnju razvoja tržišta jalovom snagom. Ipak, za sigurno vođenje pogona nužno je u svakom trenutku osigurati dovoljnu pričuvu jalove snage u EES-u te za OPS-a nije prihvatljivo rješenje da određena metodologija uvjetuje količinu te pričuve, tj. da određuje da li će ponuđača uopće biti ili se ni jednom od sudionika neće isplatiti pružati pomoćnu uslugu regulacije napona i jalove snage. Nužno je putem zakonske regulative postaviti određene obveze oko sudjelovanja proizvodnih jedinica u regulaciji napona i jalove snage, bez obzira na primijenjenu metodologiju i stupanj razvijenosti tržišta jalovom snagom. Isto tako, zakonskom regulativom potrebno je odrediti i dozvoljeni raspon faktora snage potrošača priključenih na prijenosnu i distribucijsku mrežu u ovisnosti o potrošnji djelatne snage, ali i uspostaviti mehanizme koji će potaknuti distribuiranu proizvodnju, tj. proizvođače priključene na distribucijsku mrežu, na sudjelovanje u kompenzaciji jalove snage.

### 3.2 Naknada troškova proizvodnje jalove snage na ustrojnom tržištu jalove snage

Cilj ustroja tržišta pomoćnom uslugom regulacije napona i jalove snage je, osim osiguranja sigurnosti EES-a, i osiguranje ekonomičnosti pogona EES-a sa stanovišta OPS-a. To znači da troškovi vođenja sustava pri osiguranju pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage na tržištu moraju biti minimalni, kako bi time i ukupna cijena električne energije za krajnjeg kupca bila minimalna. Time se ostvaruje tzv. društvena dobrobit (eng. social benefit). Društvena dobrobit najčešća je funkcija cilja pri teorijskim razmatranjima ustroja tržišta jalovom snagom. Minimiziranje ukupnih troškova OPS-a, odnosno maksimiziranje društvene dobrobiti, postiže se proračunom optimalnih tokova snaga (eng. optimal power flow) pri čemu se funkcija cilja najčešće sastoji od više izraza, a svaki od njih odnosi se na određeni kriterij kojeg je potrebno zadovoljiti. Tako osmišljen proračun optimalnih tokova snaga naziva se i višekriterijski (eng. multi-objective). U literaturi se navode različiti oblici funkcije cilja višekriterijskog proračuna optimalnih tokova snaga, ali

svima su zajednička dva kriterija: minimalni gubici djelatne snage i osiguranje sigurnosti sustava, [2,11,12].

Jedan od mogućih ustroja tržišta jalovom snagom temelji se na sljedećem principu: ponuđači pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage daju OPS-u dugoročne ili kratkoročne ponude koje sadržavaju regulacijski opseg te krivulju unutarnjih gubitaka generatora, slika 4.

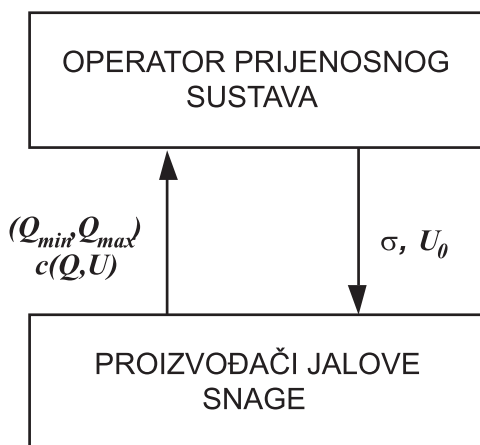


Slika 4 - Krivulja gubitaka sinkronog generatora

Krivulja gubitaka vrednuje se prema postignutoj graničnoj cijeni na dnevnom tržištu djelatnom električnom energijom. OPS računa trenutne cijene jalove snage u svakom čvorištu sustava minimizirajući troškove gubitaka prijenosa i troškove naknade proizvođačima jalove snage, osiguravajući pri tome određeni kriterij sigurnosti sustava, npr. maksimizirajući udaljenost od točke sloma napona u sustavu. OPS provodi optimalni dispečing jalove snage šaljući proizvođačima postavne vrijednosti automatskih regulatora napona generatora. Dodatno im šalje i izračunate trenutne cijene jalove snage za potrebe izračuna financijske naknade. Angažiranim proizvođačima jalove snage, induktivne ili kapacitivne, troškovi pogona nadoknađuju se množenjem iznosa proizvedene jalove energije s trenutnom cijenom jalove energije dobivenom od OPS-a. Obračun se izvodi satno uzimajući tržišnu vrijednost djelatne električne energije kao referentnu vrijednost. Na slici 5 prikazana je razmjena nužnih podataka između OPS-a i ponuđača pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage u tržišnom okruženju.

Ako se potrošnja jalove snage u sustavu poveća u nekom trenutku za određeni iznos, ta će se jalova snaga nadoknaditi automatski, djelovanjem primarnih regulatora napona na generatorima, ili ručno, intervencijom iz dispečerskog centra upravljanja. Optimalnim dispečingom jalove snage nastoji se pri tome pronaći optimalna pogonska točka sa stanovišta ekonomičnosti i sigurnosti EES-a. Jedinični trošak sustava, povećan radi porasta potrošnje jalove

snage, naziva se trenutna cijena jalove snage u čvorištu  $i$ , a označava se sa  $\sigma_i$ . Pri tome trenutna cijena jalove snage ima dvije komponente: komponentu koja se odnosi na gubitke prijenosa,  $\sigma_{gj}$ , i komponentu koja se odnosi na sigurnost sustava,  $\sigma_{sj}$ . Proračun optimalnih tokova snaga rješava problem optimalnog dispečinga jalove snage dajući kao izlaz optimalna podešenja postavnih vrijednosti automatskih regulatora napona generatora i cijene jalove snage u svakom čvorištu sustava.



Slika 5 - Razmjena podataka u okruženju tržišta jalovom snagom

Pri određivanju izraza za trenutnu cijenu jalove snage posebno treba razmatrati čvorišta opterećenja (tzv.  $PQ$  čvorišta), a posebno čvorišta s proizvodnjom jalove snage (tzv.  $PV$  čvorišta). Povećanje potrošnje jalove snage u  $PV$  čvorištu, ili pojednostavljeno gledano generatorskom čvorištu, bit će vrlo vjerojatno u cijelosti nadoknađeno iz tog čvorišta. Stoga trošak naknade za proizvodnju dodatne jalove snage ovisi o pogonskim troškovima generatora u tom čvorištu. Izraz za trenutnu cijenu jalove snage u tom slučaju glasi:

$$\sigma_j = \sigma_{gj} + \sigma_{sj} = \frac{\partial T_{Qj}(Q_j, U_j)}{\partial Q_j} + \frac{\partial U_j}{\partial Q_j} \frac{\partial T_{Qj}(Q_j, U_j)}{\partial U_j} \quad (7)$$

gdje je  $j$  oznaka za  $PV$  čvorište,  $T_{Qj}(Q_j, U_j)$  je funkcija troška generatora zbog proizvodnje jalove snage  $Q_j$ , a  $\partial U_j / \partial Q_j$  promjena napona na sabirnicama generatora zbog promjene proizvodnje jalove snage.

Povećanje potrošnje jalove snage u  $PQ$  čvorištima uzrokovati će troškove povećanja proizvodnje jalove snage iz generatorskih čvorišta, troškove zbog gubitaka prijenosa te moguće gubitke zbog potrebe redispetchinga određenih elektrana kako bi se zadovoljila ograničenja prijenosne moći sustava koja može biti smanjena zbog potreba prijenosa jalove snage. Izraz za trenutnu cijenu jalove snage tada glasi:

$$\sigma_i = \sigma_{gi} + \sigma_{si} = \sum_{j \in G} W_{ij} \sigma_j + \lambda_p \frac{\partial P_G}{\partial Q_i} + \sum_{Nk} \sigma_{Nk,i} \quad (8)$$

pri čemu je  $j$  oznaka  $PV$  čvorišta, a  $i$  oznaka za  $PQ$  čvorište.  $W_{ij}$  je matrica težinskih faktora koji određuju doprinos proizvodnje jalove snage u čvorištu  $j$  podmiranju povećane potrošnje jalove snage u čvorištu  $i$  bez uzimanja u obzir ograničenja sustava. Izraz  $\partial P_G / \partial Q_i$  predstavlja povećanje gubitaka prijenosa zbog povećanja potrošnje jalove snage  $Q_p$ , dok  $\lambda_p$  označava graničnu cijenu djelatne snage sustava.  $\sigma_{Nk}$  označava granični doprinos  $N_k$  ( $k$ -to ograničenje prijenosnog sustava) pogonskim troškovima sustava. Taj je doprinos različit od nule jedino kada je ograničenje u proračunu optimalnih tokova snaga aktivno, tj. nametnuto. U jednadžbi (8) prva dva izraza pripadaju komponenti koja se odnosi na gubitke prijenosa,  $\sigma_{gj}$ , a treći izraz predstavlja komponentu koja se odnosi na sigurnost sustava,  $\sigma_{sj}$ . Sigurnosna komponenta je u pravilu manja od komponente gubitaka, ali može narasti do znatnih vrijednosti ako je zbog ograničenja prijenosnog sustava potrebno angažirati proizvođača s višom ponuđenom cijenom (utjecaj tržišne moći).

Iako su tržišne metode naknade troškova ponuđačima za pružanje pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage složenije i teže ih je primijeniti, one su točnije i pravednije za sve sudionike na tržištu. Osim toga, na taj se način omogućuje ekonomska učinkovitost šaljući ispravnu poruku potencijalnim ulagačima u nove izvore jalove snage u pojedinoj regulacijskoj zoni čime se smanjuju moguće pojave tržišne moći određenih proizvođača jalove snage.

S obzirom na lokalni karakter napona u mreži te neisplativost opskrbe jalovom snagom električki udaljenih područja praktično rješenje je ustroj lokalnih tržišta jalovom snagom [1], pogotovo za velike EES-e. To znači da bi određeni broj proizvođača i potrošača, okupljenih unutar električki definirane zone, sudjelovao u tržištu koje bi vodio i nadzirao OPS. Pod zonom se podrazumijeva dio EES-a koji obuhvaća određeni broj čvorišta i vodova čija se pripadnost zoni određuje putem određene metodologije. Metoda za uspostavu takvih zona mogla bi se temeljiti na principu pilot-čvorišta i električnih udaljenosti koji je prvi put primijenjen od strane EDF-a za potrebe uspostave sekundarne regulacije napona i jalove snage [13], a danas se koristi u više europskih elektroenergetskih sustava. Spomenuta metodologija je ispitana u praksi i dokazala se, uz određene modifikacije, uspješnom pri rješavanju problematike lokalnog karaktera upravljanja naponom i jalovom snagom što je čini prikladnim rješenjem.

Lokalni pristup rezultirao bi povećanju učinkovitosti tržišta jalovom snagom budući da bi se OPS-u pojednostavilo vođenje tržišta i administracija. Isto tako, mogli bi se uspostaviti različiti standardi u različitim zonama ovisno o uvjetima koji vladaju u pojedinoj zoni s obzirom na broj i vrstu izvora jalove snage te karakter potrošača. Lokalno utemeljeni standardi smanjili bi moguće pojave tržišne moći

jer bi se kroz politiku cijena poticala izgradnja izvora jalove snage u regulacijskim zonama s nedovoljnom proizvodnjom iste. Pri tome bi bila omogućena i međuzonska razmjena jalove snage, ako bi to bilo ekonomski opravdano ili nužno za održanje sigurnosti i stabilnosti EES-a. Za očekivati je da bi se i troškovi OPS-a u lokalnom okruženju tržišta jalovom snagom smanjili, ali je takvu pretpostavku ipak potrebno potvrditi proračunima na simulacijskom modelu.

#### 4 PREGLED USTROJA TRŽIŠTA JALOVOM SNAGOM U SVIJETU

Odnos prema pomoćnim uslugama sustava pa tako i prema pomoćnoj usluzi regulacije napona i jalove snage u zemljama s razvijenim tržištem električne energije je različit. Dok su u nekim zemljama uspostavljeni mehanizmi za financijsku naknadu troškova proizvodnje jalove snage, u drugima se nastavlja osiguravati regulacija napona i jalove snage kroz regulatorne okvire i tehničke smjernice pogona EES-a, kao što su Mrežna pravila. U nastavku je dan pregled metodologija za određivanje naknade proizvođačima za troškove osiguranja pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage u zemljama koje imaju najrazvijenija tržišta jalovom snagom.

##### 4.1 SAD

Prema standardima Sjevernoameričkog vijeća za pouzdanost napajanja električnom energijom ili NERC-a (eng. North American Electric Reliability Council) sinkroni generatori su jedini ponuđači pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage. Ostali energetske subjekti ne dobivaju naknadu za kompenzaciju jalove snage već se takvi uređaji smatraju sastavnim dijelom prijenosnog sustava. Svi sinkroni generatori moraju raditi s uključenom automatskom regulacijom napona kako sigurnost sustava niti u jednom trenutku ne bi bila ugrožena. EES SAD-a podijeljen je u tri velike interkonekcije (Western Int., Eastern Int., ERCOT), a unutar svake od njih postoji više regulacijskih područja. Budući da je vođenje ustrojeno prema ISO (eng. Independent System Operator) modelu, postoje određene razlike među Operatorima u smislu regulacije napona i jalove snage. U nastavku je opisan ustroj tržišta jalovom snagom u tri regulacijska područja.

##### 4.1.1 New York ISO

New York ISO (NYISO) osigurava uslugu regulacije napona i jalove snage određivanjem cijene ukupnih troškova proizvodnje jalove snage sinkronih generatora. Obračun troškova usluge regulacije napona i jalove snage uključuje fiksne i pogonske troškove angažiranih generatora, te eventualne oportunitetne troškove. Fiksni troškovi odnose se na kapitalne investicije, a pogonski na troškove održavanja i druge troškove. U slučaju smanjenja

proizvodnje djelatne snage radi proizvodnje jalove snage proizvođači imaju pravo na naknadu oportunitetnog troška koji se izračunava na temelju sljedećih podataka: lokalnoj graničnoj cijeni djelatne energije, smanjenju proizvodnje djelatne snage, cjenovnoj krivulji djelatne energije. Način obračunavanja oportunitetnog troška prikazan je na slici 6.

$c_{PGR}$  je lokalna granična cijena djelatne energije u stvarnom vremenu,  $f(P)$  je cjenovna krivulja djelatne energije,  $P_1$  i  $P_2$  su početna i krajnja vrijednost proizvodnje djelatne snage generatora (početni i krajnji dispečing), a  $c_{P1}$  i  $c_{P2}$  su odgovarajuće cijene djelatne energije u početnoj i krajnjoj pogonskoj točki. Smanjenjem proizvodnje djelatne snage proizvođač će izgubiti određeni prihod zbog neostvarene prodaje djelatne električne energije, ali će pri tome i pogonski troškovi biti niži. Smanjeni prihod proizvođača  $\Delta R$  zbog oportunitetnog troška dan je sljedećim izrazom:

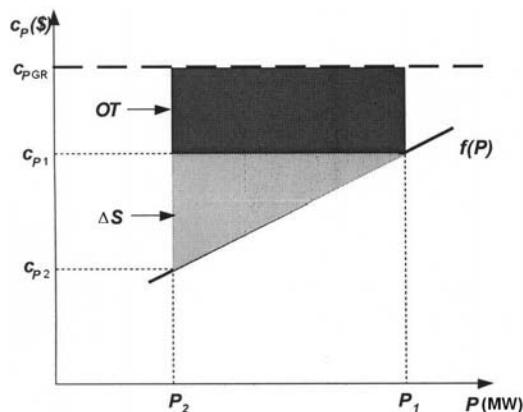
$$\Delta R = c_{PGR}(P_1 - P_2) - \int_{P_1}^{P_2} f(P) dP \quad (9)$$

Prvi dio izraza u (9) označava financijski gubitak radi smanjene proizvodnje djelatne snage, a drugi odgovarajuće smanjenje pogonskih troškova. Ušteda generatora zbog smanjene proizvodnje djelatne snage  $\Delta S$  može se izraziti kao:

$$\Delta S = c_{P1}(P_1 - P_2) - \int_{P_1}^{P_2} f(P) dP \quad (10)$$

Oportunitetni trošak generatora  $OT$  jednak je razlici između (9) i (10):

$$OT = (c_{PGR} - c_{P1}) \cdot (P_1 - P_2) \quad (11)$$



Slika 6 - Metoda izračuna oportunitetnog troška od strane NYISO

##### 4.1.2 California ISO

California ISO osigurava uslugu regulacije napona i jalove snage u regulacijskom području koje obuhvaća američku

saveznu državu Kaliforniju sklapanjem dugoročnih ugovora s pouzdanim proizvodnim jedinicama. Konačni plan kratkoročnih zahtjeva za jalovom snagom određuje se dan unaprijed, nakon zatvaranja voznog reda EES-a (očekivana potrošnja i ugovorena proizvodnja djelatne snage). ISO analizom tokova snaga određuje očekivanu potrebu za jalovom snagom u lokalnim područjima EES-a te izdaje odabranim proizvodnim jedinicama i područnim Operatorima prijenosnog sustava vozni red napona. Generatori su dužni osigurati jalovu snagu u području faktora snage iznosa 0,9 induktivno i 0,95 kapacitivno. Za proizvodnju jalove snage izvan tog područja isplaćuje im se financijska naknada.

#### 4.1.3 Pennsylvania – New Jersey – Maryland

U regulacijskom području Pennsylvania – New Jersey – Maryland (PJM) razlikuju se dvije komponente usluge regulacije napona i jalove snage. Prva komponenta odnosi se na kapacitet proizvodnje jalove snage pri nazivnoj proizvodnji djelatne snage generatora, a druga pri smanjenoj proizvodnji djelatne snage generatora. Kupci električne energije plaćaju naknadu za prvu komponentu razmjerno ukupnim mjesečnim potraživanjima proizvođača i iznosu mjesečnog korištenja mreže. Druga komponenta razmjerna je oportunitetnom trošku pri čemu se taj trošak izračunava kao lokalna granična cijena djelatne električne energije umanjena za cijenu ponude za svaki MW koji nije ostvaren.

## 4.2 Europska unija

### 4.2.1 Velika Britanija

Mrežna pravila elektroenergetskog sustava Velike Britanije propisuju minimalno obvezno pružanje usluge regulacije napona i jalove snage generatora nazivne djelatne snage preko 50 MW. Kako bi mogli ostvariti naknadu za troškove proizvodnje jalove snage proizvođači moraju biti sudionici tzv. osnovnog mehanizma plaćanja (eng. default payment mechanism) ili ponuditi osnovnu uslugu na tržištu korištenjem tendera. Proizvodnja jalove snage radi zadovoljenja Mrežnih pravila naziva se obvezna ili mandatna usluga (eng. Obligatory Reactive Power Service). Prihod koji generator može ostvariti ovisi o potrebama EES-a za jalovom snagom te broju generatora koji pružaju uslugu u određenom području. Ponuđači čiji generatori koji imaju mogućnost većeg regulacijskog opsega mogu ponuditi i tzv. proširenu uslugu regulacije napona i jalove snage (eng. Enhanced Reactive Power Service). NGC (eng. National Grid Company), britanski operator prijenosnog sustava, izdaje tendere za osnovnu i proširenu uslugu regulacije napona i jalove snage te prikuplja ponude ponuđača usluge. Tenderi se izdaju dva puta godišnje, 1. travnja i 1. listopada. Ponude se sastoje od dvije komponente cijene za ponuđenu uslugu: cijene

spособnosti (eng. capability price) i cijene iskorištenja (eng. utilization price). Postoje dvije vrste cijene sposobnosti: cijena sinkrone sposobnosti i cijena raspoloživosti. Za oba tipa cijene ponuđači daju krivulju troškova s najviše tri jedinične cijene, pri čemu se svaka od cijena odnosi na određeno područje rada generatora prema pogonskoj karti. Takva se krivulja daje i za cijenu iskorištenja. U praksi opisana metodologija nije zaživjela kako se očekivalo. Prema podacima iz 2000. godine od 95 generatora koji su potpisali ugovor s NGC-om o pružanju pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage niti jedan nije ponudio proširenu uslugu.

### 4.2.2 Švedska

Pomoćna usluga regulacije napona i jalove snage u Švedskoj je obvezna, bez postojanja mehanizma za naknadu troškova generatorima. Tokovima jalove snage upravlja švedski operator sustava Svenska Kraftnät prema ISO modelu. Svenska Kraftnät nadzire 400 kV i 220 kV mrežu dok su niže naponske razine u nadležnosti regionalnih prijenosnih i distribucijskih tvrtki. Preporuka je da se razmjena jalove snage između različitih regija drži na minimumu, a svaka je regionalna prijenosna tvrtka dužna održavati napon u propisanim granicama unutar svoje regije. Iako nezavisni operator sustava ima pravo u svakom trenutku zatražiti od sinkroniziranih generatora potporu jalovom snagom u normalnim se pogonskim uvjetima maksimalno koriste mrežni kompenzacijski uređaji, dok se velike generatorske jedinice koriste za potrebe sekundarne regulacije napona i jalove snage te u izvanrednim pogonskim uvjetima. Svenska Kraftnät sklapa formalne sporazume s proizvođačima i regionalnim prijenosnim tvrtkama o pružanju pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage prema sljedećem principu:

- hidrogeneratori moraju osigurati induktivnu jalovu snagu u iznosu  $1/3P_{\max}$  te kapacitivnu jalovu snagu u iznosu  $1/6P_{\max}$ ,
- turbogeneratori moraju osigurati induktivnu jalovu snagu u iznosu  $1/3P_{\max}$ ,
- regionalne prijenosne tvrtke koje opskrbljuju nacionalnu mrežu djelatnom snagom  $P_{tr}$  dužne su osigurati induktivnu jalovu snagu u iznosu  $1/3P_{tr}$ ,
- regionalne prijenosne tvrtke koje se opskrbljuju djelatnom snagom iz nacionalne mreže nemaju obveza u pitanju jalove snage.

### 4.2.3 Finska

Finski ISO, Fingrid, odgovoran je za regulaciju napona i jalove snage, koju provodi koristeći mrežne kompenzacijske uređaje te OLTC transformatore. Dodatno se koristi jalova snaga generatorskih jedinica većih od 10 MVA. Ta je pomoćna usluga definirana kao obvezna. Generatori priključeni na 400 kV naponsku razinu dužni su trenutno

osigurati puni regulacijski opseg dok za generatore priključene na 220 kV i 110 kV pričuva jalove snage ne smije iznositi manje od proračunate vrijednosti koja odgovara nazivnom faktoru snage 0,9. Ostatak se može koristiti u komercijalne svrhe. Generatori priključeni na naponske razine niže od 110 kV dužni su osigurati trenutnu pričuvu jalove snage za slučaj poremećaja u iznosu polovice njihovog induktivnog regulacijskog opsega.

#### 4.3 Australija

NEMCO (eng. National Electricity Market Management Company), australijski ISO, osigurava pomoćnu uslugu regulacije napona i jalove snage koristeći ponude od strane generatora i sinkronih kompenzatora. Ponuđači ove pomoćne usluge dobivaju naknadu za raspoloživost s obzirom na njihove dinamičke mogućnosti pružanja potpore jalovom snagom. Sinkroni kompenzatori dodatno dobivaju naknadu za angažiranje u slučaju njihova korištenja. Sinkronima generatorima priznaju se oportunitetni troškovi. Proizvodnja jalove snage iz sinkronih generatora sastoji se iz dva dijela:

1. Obvezni regulacijski opseg, od 0,9 induktivno do 0,93 kapacitivno, kojeg je dužan osigurati svaki generator sinkroniziran na mrežu,
2. Ostatak regulacijskog opsega generatora, koji se može koristiti u svrhu osiguranja pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage.

NEMCO putem analize tokova snaga određuje potrebe sustava za jalovom snagom. Težište je na maksimalnom korištenju mrežnih kompenzacijskih uređaja. Dodatno se jalova snaga osigurava putem obveznog regulacijskog opsega angažiranih generatora. Pri povećanim potrebama sustava za jalovom snagom prvo se koriste dodatni regulacijski kapaciteti generatora, a zatim se anagažiraju i sinkroni kompenzatori. Ako i dalje postoji potreba za jalovom snagom koristi se puni regulacijski opseg generatora uz ograničavanje proizvodnje djelatne snage. Ako iskorištenje svih raspoloživih izvora jalove snage nije dovoljno za očuvanje sigurnosti sustava tada se pribjegava otkazivanju transakcija električne energije.

#### 4 ZAKLJUČAK

Procesom deregulacije elektroenergetskog sektora i uspostavom tržišta električne energije neminovno se nameće i pitanje osiguranja pomoćnih usluga sustava nužnih za normalan rad EES-a. Uspostava mehanizama za financijsku naknadu proizvodnje jalove snage nužan je korak na tom putu. Člankom je obuhvaćena problematika uspostave tržišnih mehanizama za osiguranje pomoćne usluge regulacije napona i jalove snage te posljedice takvog ustroja na korisnike EES-a. Na temelju dostupne literature nameće se jedan osnovni zaključak: ključ za

uspostavu funkcionalnog tržišta jalovom snagom točno je i razvidno određivanje troškova proizvodnje/potrošnje jalove snage te uspostava mehanizma za pravednu naknadu tih troškova. U članku su raščlanjeni i opisani troškovi proizvodnje/potrošnje jalove snage sinkronih generatora te mrežnih kompenzacijskih uređaja. Predložen je jedan od mogućih ustroja tržišta jalovom snagom provođenjem izračuna trenutne cijene jalove snage u čvorištima EES-a. Trenutna cijena jalove snage sastoji se od komponente gubitaka prijenosa i komponente koja se odnosi na sigurnost sustava. Predložen je ustroj lokalnih tržišta jalovom snagom radi povećanja učinkovitosti OPS-a i smanjenja troškova upravljanja naponima i jalovim snagama.

Pri uvođenju mehanizama za naknadu troškova proizvodnje jalove snage potrebno je poticati investicije u veći regulacijski opseg novih proizvodnih jedinica kao i instalaciju mrežnih kompenzacijskih uređaja. Korištenje generatora kao uređaja za osiguranje potpore jalovom snagom može biti ekonomski neisplativo u slučaju učestalog smanjivanja proizvodnje djelatne snage generatora radi povećanih potreba za jalovom snagom. Sa stanovišta sigurnosti EES-a OPS ne može utjecati na raspoloživost generatora koji se mogu izvrstiti iz mreže ili nenadano ispasti iz pogona ostavljajući tako sustav bez potrebne potpore jalovom snagom. Zato je nužno da nadležno regulatorno tijelo politikom cijena motivira OPS za investiranje u mrežne kompenzacijske uređaje kako bi fleksibilnije mogao održavati napone u mreži te imati u svojim rukama potpunu nadležnost i odgovornost za siguran pogon EES-a.

#### LITERATURA

- [1] HAO S., PAPALEXOPOULOS A., Reactive power pricing and management, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997, pp. 95-104
- [2] DONA V., PAREDES A., Reactive power pricing in competitive electric market using the transmission losses function, 2001 IEEE Porto Power Tech Conference, 10-13 September 2001, Porto, Portugal
- [3] ZHONG J., BHATTACHARYA K., Reactive power as an ancillary service, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.16, No.2, May 2001, pp. 294-300
- [4] ZHONG J., BHATTACHARYA K., Reactive power management in deregulated electricity markets—A Review, Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting, January 2002, pp.1287 – 1292, New York, USA
- [5] WEBER J.D., OVERBYE T.J., SAUER P.W., DEMARCO C.L., A simulation based approach to pricing reactive power, 1998 IEEE Conference on System Sciences, January 6-9, 1998., Kona, Hawaii, USA
- [6] VRKIĆ N., VRKIĆ I., Crpni režim rada RHE Velebit – Obrovac, Šesto savjetovanje HK CIGRE, 09.-13. Studeni, 2003., Cavtat, Hrvatska

- [7] LAMONT J.W., FU J., Cost analysis of reactive power support, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August 1999., pp. 890-898.
- [8] SILVA E., HEDGECOCK J., MELLO J.C., LUZ J.C., Practical cost-based approach for the voltage ancillary service, 2002 IEEE/PES Winter Meeting, January 28-31, 2002, New York, USA
- [9] KIRBY B., HIRST E., Ancillary Services Detail: Voltage Control, Oak Ridge National Laboratory Technical Report, December 1997, ORNL/CON-453
- [10] HORWILL C., GEMMEL B.D., Effective reactive compensation management: Win-Win strategy!, Proc. 2002 IEEE/PES Winter Meeting, January 28-31, 2002, New York, USA
- [11] ROSEHART W., CAÑIZARES C., QUINTANA V.H., Optimal power flow incorporating voltage collapse constraints, 1999 IEEE/PES Summer Meeting, , July 1999, Edmonton, Alberta, Canada
- [12] GIL J.B., ROMAN G.S., RIOS J.J.A., MARTIN P.S., Reactive power pricing: a conceptual framework for remuneration and charging procedures, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000, pp. 483-489
- [13] PAUL J.P., LEOST J.Y., TESSERON J.M., Survey of the secondary voltage control in France: present realization and investigations, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 2, No.2, May 1987, pp. 505-511

#### VOLTAGE AND REACTIVE POWER REGULATION AS AUXILIARY SYSTEM SERVICE

In spite of electric energy market development the calculation of production/consumption costs of synchronous generator reactive power and network compensation equipment is not defined in detail and the employment of market mechanism for reactive power in most of the countries is at the very beginning. The reason for that is low economic influence of reactive power flows optimization. Because of its influence on active power transmission possibilities, connection to voltage values in the system and to voltage stability of the electric power system, reactive power deserves attention and serious concern in order to be able to define its price

on the market. In the article the problems of reactive power production/consumption cost determination are described and mechanisms to organize reactive power market are given. A review on existing reactive power market models in the world is also given.

#### REGELUNG DER SPANNUNG UND DER BLINDLEISTUNG ALS HILFSLEISTUNGEN DES SYSTEMS

Trotz der Entwicklung des Strommarktes ist die Berechnung von Kosten der Erzeugung und des Verbrauches der Synchrongeneratoren-Blindleistung, sowie von Kosten der Kompensationsanlagen im Netz, noch nicht zur Gänze definiert; die Einführung auch der Marktabläufe für die Blindleistung steckt noch in der Anfangsphase. Grund dafür ist die geringe wirtschaftliche Bedeutung der Optimierung von Blindleistungsflüssen. Wegen ihrer Einwirkung auf die Übertragungsfähigkeit der Wirkleistung sowie ihrem Einfluss auf die Beträge der Spannung im System, und dadurch letztendlich auf die Stabilität des elektroenergetischen Systems, verdient die Blindleistung Aufmerksamkeit und ernste Überlegungen mit dem Zweck der Gestaltung eines Verfahrens zur Bestimmung ihres Marktpreises. Im Artikel sind Überlegungen bezüglich Kostenbestimmung von Erzeugung und Verbrauch der Blindleistung und die für die Inangangsetzung des Blindleistungsmarktes notwendigen Abläufe beschrieben. Gegeben ist auch die Übersicht bedeutenderer Vorbilder mancher errichteten Blindleistungsmärkte.

Naslov pisaca:

**Mr. sc. Tomislav Plavšić, dipl. ing.**  
**HEP Operator prijenosnog sustava d.o.o.**  
**Kupska bb, 10000 Zagreb, Hrvatska**  
**Doc. dr.sc. Igor Kuzle, dipl. ing.**  
**Fakultet elektrotehnike i računarstva**  
**Zavod za visoki napon i energetiku**  
**Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:  
 2005-03-11